



Новые подходы к формированию транспортных расписаний



Николай КЛЕВАНСКИЙ
Nikolai N. KLEVANSKY

Максим АНТИПОВ
Maksim A. ANTIPOV



Клеванский Николай Николаевич — кандидат технических наук, профессор кафедры «Экономическая кибернетика» Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова, Саратов, Россия.

Антипов Максим Анатольевич — аспирант Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова, Саратов, Россия.

New Approaches to Development of Transport Schedules
(текст статьи на англ. яз. — English text of the article — p. 24)

Авторы статьи обосновывают выбор методов формирования расписания движения поездов дальнего следования на основе эвристических подходов и с учётом нецикличности пассажиро- и грузопотоков. В процессе алгоритмизации и разработки программного обеспечения для решения представленных задач используются концепции идеологии жадного алгоритма, загрузки и равномерности, целевого программирования в рамках требований системы управления безопасностью движения, ранжирования теории принятия решений. Двухэтапный процесс процедур включает формирование начального расписания и последующую его оптимизацию. Соответственно задачам предложены математическая модель и алгоритмы реализующих действий.

Ключевые слова: транспорт, формирование расписаний, методологические подходы, эвристика, математическая модель, алгоритмы.

Одним из представителей транспортных систем с достаточно жёсткими ограничениями является железнодорожный транспорт с его постоянным сезонным расписанием пассажирских поездов. При этом задача формирования расписания поездов в научных публикациях рассматривается обычно в двух видах: цикличном и нецикличном [1–3].

Циклические расписания характерны для западноевропейских стран с высокой плотностью населения и большими пассажиропотоками. Такие расписания обеспечивают строгую периодичность в пределах суток или части суток. В российских условиях при значительных расстояниях между крупными городами циклические расписания пассажирских перевозок не применимы.

К нециклическим относят расписания пассажирских поездов дальнего следования и расписания грузовых поездов. Большинство их моделей формирования основаны на процедурах линейного программирования. Оба типа моделей приводят к задачам очень большой размерности, для решения которых используют различные

эвристики. К примеру, релаксация по Лагранжу [4], генерация колонок [5], задача цеха [6].

В нашей статье целью ставится представление новых эвристических методов формирования расписания движения пассажирского железнодорожного транспорта дальнего следования.

1.

В процессе алгоритмизации и разработки программного обеспечения для формирования расписания нами привлечены следующие концепции [7]: программное решение задачи в рамках системы управления безопасностью движения; двухэтапный процесс решения; идеология жадного алгоритма; концепции загруженности и равномерности; использование методов ранжирования теории принятия решений.

Двухэтапный процесс решения задачи включает формирование начального расписания и последующую его оптимизацию. Под начальным понимается программно сформированное расписание при соблюдении обязательных ограничений. Методы обоих этапов цикличны и завершаются либо после включения всех маршрутов в начальное расписание, либо при невозможности дальнейшего улучшения расписания.

Задача формирования начального расписания решается последовательным выбором очередного маршрута и последующим его включением в расписание в определяемое время отправления с начальной станции. Выбор маршрута базируется на концепции загруженности, то есть на каждом шаге определяется наиболее загруженный по требуемым ресурсам маршрут. Выбор времени включения этого маршрута базируется на концепции равномерности использования ресурсов системы. То есть на каждом шаге формирования начального расписания присутствуют две операции выбора.

Задача оптимизации начального расписания решается последовательным выбором наиболее неравномерного маршрута и последующей его перестановкой в расписание в определяемое время отправления с начальной станции. Перестановка маршрута в расписание также ба-

зируется на концепции равномерности. На каждом шаге оптимизации расписания опять же присутствуют две операции выбора.

Такой подход характерен для жадных алгоритмов и он применим для задач формирования расписаний и связанных с этим задач распределения ресурсов. Использование идеологии жадных алгоритмов предполагает цикличность процедур для обоих этапов решения задачи формирования расписания.

Операции выбора в представляемых алгоритмах являются многокритериальными и для их реализации привлечен аппарат методов ранжирования [8].

2.

Исходные данные задачи:

$S = \{s_i, i = \overline{1, I}\}$ — множество станций

железнодорожной сети;

$L = \{l_j, j = \overline{1, J}\}$ — множество перего-

нов железнодорожной сети;

pl_i — количество платформ для высадки/посадки пассажиров i -ой станции;

$\Delta t_{i,j}$ — минимальный интервал времени между двумя последующими поездами при выезде/въезде с j -го перегона на i -ую станцию;

$F = \{(s, l), s \in S, l \in L\}$ — множество

инцидентных пар — станция s является одной из двух граничных станций перегона l . Очевидно, что количество элементов множества F составляет $n_f = 2 \cdot J$;

n_r — количество маршрутов железнодорожной сети;

$R = \{r_k, k = \overline{1, n_r}\}$ — множество векто-

ров заявок маршрутов;

$n_{k,s}$ — количество станций маршрута r_k ;

$$r_k = \begin{pmatrix} f_{k,i}, & \forall f_{k,i} \in F, \\ i = \overline{1, n_{k,s}}, & k = \overline{1, n_r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (l_{k,i}, s_{k,i}), \\ i = \overline{1, n_{k,s}}, & k = \overline{1, n_r} \end{pmatrix} \quad (1)$$

вектор заявок маршрута r_k — последовательность пар — перегон/станция от начальной станции до конечной;

n_d — количество суток интервала расписания;





$Day = (day_1, day_2, \dots, day_{nd})$ – упорядоченный во времени вектор суток;
 $Interval = 24 \cdot n_d$ – интервал расписания, часы;

n_k – количество суток отправления поездов k -го маршрута;

$$Day_k = \{day_{k,i}, i = \overline{1, n_k}, day_{k,i} \in Day\},$$

$$k = \overline{1, n_r} -$$

множество суток отправления поездов маршрутов;

$$n_t = \sum_{k=1}^{n_r} n_k - \text{количество поездов расписания};$$

$U = \{(r, day), r \in R, day \in Day\}$ – множество инцидентных пар, частично формирующих заявки поездов маршрутов – поезд маршрута r должен отправляться с начальной станции в день day ; используя (1), получаем множество заявок поездов маршрутов:

$$U = \left\{ \begin{array}{l} day_{k,j}, \left(\begin{array}{l} (l_{k,i}, s_{k,i}), \\ i = \overline{1, n_{k,s}} \end{array} \right), \\ k = \overline{1, n_r}, j = \overline{1, n_k}, \\ day_{k,j} \in Day \end{array} \right\}; \quad (2)$$

$$d_{k,i} = \left((l_{k,i}, s_{k,i}, \text{int}_{k,i}), i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r} \right) -$$

заявка на прохождение маршрута k по i -му перегону на i -ую станцию, где $\text{int}_{k,i}$ – интервал времени движения от $(i-1)$ -ой станции до i -ой станции; заявка на прохождение поезда $u_{k,j}$ по i -ому перегону на i -ую станцию

$$d_{k,i,j} = \left(\begin{array}{l} (l_{k,i}, s_{k,i}, \text{int}_{k,i}, day_{k,j}), \\ i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}, \\ j = \overline{1, n_k}, day_{k,j} \in Day \end{array} \right), \quad (3)$$

где $day_{k,j}$ принимается равным дню отправления поезда маршрута.

Исходные расчётные данные задачи:

$nt_i, i = \overline{1, I}$ – количество поездов, проходящих через i -ую станцию;

$nl_j, j = \overline{1, J}$ – количество поездов, проходящих через j -ый перегон.

3.

Переменные задачи:

ni – количество включенных в начальное расписание маршрутов или оптимизированных (переставленных) маршрутов в расписании;

nr – количество не включенных в начальное расписание маршрутов или не оптимизированных маршрутов в расписании;

nit – количество включенных в начальное расписание поездов;

nit_i – количество включенных в начальное расписание поездов, проходящих через i -ую станцию;

nil_j – количество включенных в начальное расписание поездов, проходящих через j -ый перегон;

ti, tf – время прибытия/отправления поездов на станцию;

til, tfl – время выезда поездов на перегон и с перегона;

TI_k – время отправления поездов маршрута r_k с начальной станции, $TI_k = ti_{k,1}$.

Событие расписания, порождаемое заявкой (3), по прохождению поезда $u_{k,j}$ маршрута r_k по i -ому перегону на i -ую станцию будет определяться следующим выражением

$$e_{k,i,j} = \left(\begin{array}{l} (l_{k,i}, s_{k,i}, \text{int}_{k,i}, day_{k,j}, ti_{k,i,j}, tf_{k,i,j}), \\ i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}, \\ j = \overline{1, n_k}, day_{k,j} \in Day \end{array} \right); \quad (4)$$

$day_{k,j}, ti_{k,i,j}$ и $tf_{k,i,j}$ в (4) определяются на каждом шаге формирования расписания;

оценка загруженности i -ой станции по проходящим через нее поездам

$$c1_i = \frac{nt_i - nit_i}{nt - nit}, i = \overline{1, nit_i}; \quad (5)$$

оценка загруженности j -ого перегона по проходящим через него поездам

$$c2_j = \frac{nl_j - nil_j}{nt - nit}, j = \overline{1, nil_j}; \quad (6)$$

скалярная оценка загруженности k -го маршрута по суткам расписания

$$c3_k = \frac{n_k}{n_d}, k = \overline{1, n_r}; \quad (7)$$

оценка равномерности события расписания i -ой станции $k1_{k,i,j}$;

$$k1_{k,i,j} = \frac{nit_i (ti_{suc} + ti_{prec} - 2ti_{k,i,j})}{2 \cdot Interval},$$

$$i = \overline{1, n_{k,s}}, \quad k = \overline{1, n_r}, \quad j = \overline{1, n_k}, \quad (8)$$

где ti_{prec} и ti_{suc} — времена прибытия на i -ую станцию поездов, предшествующих и последующих по отношению ко времени $ti_{k,i,j}$ в интервале расписания;

оценка равномерности распределения события $e_{k,i,j}$ в периодах расписания i -ой станции

$$k2_{k,i,j} = \frac{\sum_{j=1}^{n_d} q(s_{k,i}, t_{k,i,j}, day_{k,j})}{n_d}, \quad (9)$$

где

$$q = q(s_{k,i}, t_{k,i,j}, day_{k,j}) = \begin{cases} 1, & \text{если хотя бы один поезд во время } t_{k,i,j} \text{ дня } day_{k,j} \text{ находится на станции } s_{k,i}; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$q \in Q_s$ — множество булевых обозначений событий станций;

оценка равномерности распределения событий $K1_i$ расписания i -ой станции в интервале расписания

$$K1_i = \sqrt{\frac{1}{nt_i} \sum_{j=1}^{nt_i} (Int_i - Intr_{i,j})^2}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (10)$$

где $Int_i = \frac{Interval}{nt_i}$, $i = \overline{1, I}$ — среднее значение

интервала между прибытиями поездов на i -ую станцию;

$Intr_{i,j} = (ti_{j+1} - ti_j)$, $j = \overline{1, nt_i}$, $i = \overline{1, I}$ — величина интервала между прибытиями на станцию двух ближайших по времени поездов. Для $j = nt_i$ $ti_{j+1} = ti_1$;

оценка равномерности события расписания i -го перегона $k3_{k,i,j}$

$$k3_{k,i,j} = \frac{nil_i (ti_{suc} + ti_{prec} - 2ti_{k,i,j})}{2 \cdot Interval},$$

$$i = \overline{1, n_{k,s}}, \quad k = \overline{1, n_r}, \quad j = \overline{1, n_k}, \quad (11)$$

где ti_{prec} и ti_{suc} — времена начала движения поездов на i -ом перегоне, предшествующих и последующих по отношению ко времени $ti_{k,i,j}$;

оценка равномерности распределения события $e_{k,i,j}$ в периодах расписания i -ого перегона на въезде/выезде со станции

$$k4_{k,i,j} = \frac{\sum_{j=1}^{n_d} q(l_{k,i}, s_{k,i}, t_{k,i,j}, day_{k,j})}{n_d}, \quad (12)$$

где

$$q = q(s_{k,i}, t_{k,i,j}, day_{k,j}) = \begin{cases} 1, & \text{если хотя бы один поезд в } t_{k,i,j} \text{ дня } day_{k,j} \text{ выезжает или выезжает со станции } s_{k,i} \text{ на перегон } l_{k,i}; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$q \in Q_l$ — множество булевых обозначений событий перегона;

оценка равномерности распределения событий $K2_i$ расписания i -го перегона в интервале расписания

$$K2_i = \sqrt{\frac{1}{nl_i} \sum_{j=1}^{nl_i} (Int_i - Intr_{i,j})^2}, \quad i = \overline{1, J}, \quad (13)$$

где $Int_i = \frac{Interval}{nl_i}$, $i = \overline{1, J}$ — среднее значение

интервала между началами движения поездов по i -ому перегону;

$Intr_{i,j} = (ti_{j+1} - ti_j)$, $j = \overline{1, nl_i}$, $i = \overline{1, J}$ — величина интервала между началами движения поездов по i -ому перегону двух ближайших по времени поездов.

4.

Задача формирования начального расписания состоит в пошаговом выборе очередного маршрута r_{ni+1} и формировании расписания $S = \{TI_i, i = \overline{1, ni+1}\}$, кото-

рое многокритериально минимизирует четыре вектора оценок равномерности событий станций и перегонов выбранного маршрута

$$\min \begin{cases} (k1_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k2_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k3_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k4_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \end{cases} \quad (14)$$

при обязательных ограничениях

$$\forall s, \forall day, \forall t \sum_{t \in Interval} q \leq pl_i; \quad (15)$$

$$\forall l, \forall day, \forall t (til_i - til_{i-1}) \geq \Delta t_{i,j}$$

$$\forall l, \forall day, \forall t (tfl_i - tfl_{i-1}) \geq \Delta t_{i,j}. \quad (16)$$





Целевая функция (14) обеспечивает многокритериальную минимизацию оценок равномерности событий расписаний станций и перегонов при включении очередного маршрута в начальное расписание. Ограничения (15) касаются одновременного нахождения поездов на станциях в пределах не более количества путей с пассажирскими платформами. Ограничения (16) отражают соблюдение необходимого интервала между последовательными выездами поездов со станции и на станцию.

Оценки загруженности станций (5) и перегонов (6) формируют множества первых и вторых векторных компонент загруженности маршрутов:

$$\{ (c_{1,k}, c_{2,k}, \dots, c_{i,k}, i = \overline{1, n_{k,s}}), k = \overline{1, nr} \}; \quad (17)$$

$$\{ (c_{2,k}, c_{2,k}, \dots, c_{2,k}, i = \overline{1, n_{k,s} - 1}), k = \overline{1, nr} \}. \quad (18)$$

Многокритериальное ранжирование векторов (17) и (18) порождает множества рангов маршрутов по загруженности станций и перегонов:

$$\{ rank1_k, k = \overline{1, nr} \}; \quad (19)$$

$$\{ rank2_k, k = \overline{1, nr} \}. \quad (20)$$

Обратная сортировка выражений (7) порождает множество рангов маршрутов по загруженности суток интервала расписания

$$\{ rank3_k, k = \overline{1, nr} \}. \quad (21)$$

Ранги (19, 20, 21) формируют множество векторов маршрутов

$$\{ (rank1_k, rank2_k, rank3_k), k = \overline{1, nr} \}. \quad (22)$$

Старший по рангу маршрут, полученный многокритериальным ранжированием векторов (22), является самым загруженным и становится очередным кандидатом r_{ni+1} на включение в начальное расписание.

Для определения времени отправления с начальной станции TI_{ni+1} поездов маршрута r_{ni+1} циклично выполняются следующие действия:

для $ti_{ni+1,1} = 0$ с шагом $= 0,1$ часа до 24 часов определение значений оценок (8, 9, 11, 12) для всех перегонов и станций маршрута с учетом ограничений (15, 16) и накопление множеств векторов

$$\{ ti_{ni+1,1}, (k1_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}; \quad (23)$$

$$\{ ti_{ni+1,1}, (k2_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}; \quad (24)$$

$$\{ ti_{ni+1,1}, (k3_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}; \quad (25)$$

$$\{ ti_{ni+1,1}, (k4_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}. \quad (26)$$

Многокритериальные ранжирования векторов (23, 24, 25, 26) формируют множества векторов рангов для начальных времен движения поездов маршрута r_{ni+1}

$$\left\{ \begin{aligned} &ti_{ni+1,1}, (rank1, rank2, rank3, rank4), \\ &ti_{ni+1,1} = \overline{0, 240} \end{aligned} \right\}. \quad (27)$$

Многокритериальное ранжирование векторов (27) определяет начальное время TI_{ni+1} движения поездов маршрута r_{ni+1} в начальном расписании.

5.

Задача оптимизации начального расписания состоит в пошаговом выборе очередного маршрута r_{ni+1} и формировании расписания $S = \{ TI_i, i = \overline{1, ni+1} \}$, которое многокритериально минимизирует два вектора оценок равномерности станций и перегонов выбранного маршрута

$$\min \left\{ \begin{aligned} &(K1_i, i = \overline{1, I}) \\ &(K2_i, i = \overline{1, J}) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

при обязательных ограничениях (15) и (16).

Целевая функция (28) обеспечивает минимизацию среднеквадратичных отклонений интервалов между событиями на станциях и перегонах. Целевая функция связана с необходимостью многокритериального ранжирования получаемых векторов (28). Завершение процесса оптимизации начального транспортного расписания обусловлено принимаемой стратегией действий.

Оценки равномерности распределения событий расписаний станций (10) и перегонов (13) формируют множества первых и вторых векторных компонент равномерности маршрутов на очередном шаге оптимизации начального расписания

$$\left\{ \left(\alpha_{s,1} K1_{1,k}, \alpha_{s,2} K1_{2,k}, \dots, \right), \right. \\ \left. k = \overline{1, nr} \right\}, \quad (29)$$

где $\alpha_{s,i}$ – коэффициент важности оценки,

$$\alpha_{s,i} = \frac{nt_i}{\sum_{j=1}^I nt_j}.$$

$$\left\{ \left(\alpha_{l,1} K2_{1,k}, \alpha_{l,2} K2_{2,k}, \dots, \right), \right. \\ \left. k = \overline{1, nr} \right\}, \quad (30)$$

где $\alpha_{l,i}$ – коэффициент важности оценки,

$$\alpha_{l,i} = \frac{nl_i}{\sum_{j=1}^J nl_j}.$$

Многокритериальное ранжирование векторов (29) порождает множество рангов маршрутов по равномерности станций

$$\{rank1_k, k = \overline{1, nr}\}. \quad (31)$$

Многокритериальное ранжирование векторов (30) порождает множество рангов маршрутов по равномерности перегонов

$$\{rank2_k, k = \overline{1, nr}\}. \quad (32)$$

Ранги (31, 32) формируют множество векторов (критериев равномерности) маршрутов

$$\left\{ (rank1_k, rank2_k), \right. \\ \left. k = \overline{1, nr} \right\}. \quad (33)$$

Старший по рангу маршрут, полученный многокритериальным ранжированием векторов (33), является самым неравномерным при принятых оценках и критериях равномерности. Он становится очередным кандидатом r_{ni+1} на перестановку в начальном расписании.

Для определения времени отправления с начальной станции TI_{ni+1} поездов маршрута r_{ni+1} циклично выполняются следующие действия:

для $ti_{ni+1,1} = 0$ с шагом $= 0,1$ часа до 24 часов определить значения оценок (10, 13) для всех перегонов и станций маршрута с уче-

том ограничений (15, 16) и накоплением множеств векторов

$$\left\{ ti_{ni+1,1}, \left(\alpha_{s,i} K1_{ni+1,i,j}, \right. \right. \\ \left. \left. i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}} \right) \right\}; \quad (34)$$

$$\left\{ ti_{ni+1,1}, \left(\alpha_{l,i} K2_{ni+1,i,j}, \right. \right. \\ \left. \left. i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}} \right) \right\}. \quad (35)$$

Многокритериальные ранжирования векторов (34, 35) формируют множества векторов рангов для начальных времен движения поездов маршрута r_{ni+1}

$$\{ti_{ni+1,1}, (rank1, rank2), ti_{ni+1,1} = 0, 240\}. \quad (36)$$

Многокритериальное ранжирование векторов (36) определяет искомое начальное время TI_{ni+1} движения поездов маршрута r_{ni+1} в оптимизированном расписании железнодорожной сети.

Предложенные математическая модель и алгоритмы формирования и оптимизации начального расписания реализованы программно в рамках системы управления безопасностью движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарев А. А., Мусатова Е. Г., Гафаров Е. Р., Кварацхелия А. Г. Теория расписаний. Задачи управления транспортными системами. – М.: Физический факультет МГУ, 2012. – 159 с.
2. Peeters, L. Cyclic Railway Timetable Optimization, ERIM Ph.D. series Research in Management, Erasmus Research inst. of Management (ERIM), 2002.
3. Caprara, A., Fischetti, M., Toth, P. Modeling and solving the train timetabling problem, Operations Research, 2002, 50 (5), pp. 851–861.
4. Fischer, F., Helmberg, C., Jansen, J., Krostitz, B. Towards solving very large scale train timetabling problems by lagrangian relaxation, paper presented at the ATMOS2008 – 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems, Dagstuhl, Germany.
5. Cacchiani, V., Caprara, A., Toth, P. A column generation approach to train timetabling on a corridor, 2008, 4OR, 6 (2), pp. 125–142.
6. Burdett, R., Kozan, E. A sequencing approach for creating new train timetables, OR Spectrum, 2010, 32 (1), pp. 163–193.
7. Клеванский Н. Н. Основные концепции реализации задач формирования расписаний // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 2. – С. 9–21.
8. Клеванский Н. Н. Методы ранжирования в задачах формирования расписаний // Труды XII всероссийского совещания по проблемам управления – ВСПУ-2014. – М., 2014. – С. 8040–8050. ●

Координаты авторов: Клеванский Н. Н. – nklevansky@yandex.ru, Антипов М. А. – antipovmaxim@ya.ru.

Статья поступила в редакцию 27.06.2016, принята к публикации 30.08.2016.



Klevansky, Nikolai N., Saratov State Agrarian University n.a. N. I. Vavilov, Saratov, Russia.
Antipov, Maksim A., Saratov State Agrarian University n.a. N. I. Vavilov, Saratov, Russia.

ABSTRACT

The authors justify the choice of methods of developing schedules of long-distance trains on the basis of heuristic approaches and taking into account noncyclicity of passenger and freight flows in the Russian context. In the course of algorithmization and development of software for solutions of problems presented the concept of ideology of

greedy algorithms, congestion and uniformity, target programming in the framework of requirements of traffic safety management system, ranking of decision-making theory are used. The two-stage process of procedures includes forming the initial schedule and its subsequent optimization. A mathematical model and algorithms of implementing actions are offered according to the objectives.

Keywords: transport, timetable, schedule development, methodological approaches, heuristics, mathematical model, algorithms.

Background. One of the representatives of transport systems with fairly rigid restrictions is a rail transport with its regular seasonal schedule of passenger trains. The task of development of train schedules in scientific publications is usually considered in two forms: cyclic and non-cyclic [1–3].

Cyclic timetables are typical for the Western European countries with high population density and large passenger traffic. These schedules provide strict periodicity within a day or part of a day. In Russian conditions at large distances between major cities cyclical schedules of passenger transportation do not apply.

The schedules of long-distance passenger trains and freight trains are non-cyclic. Mostly their development is based on linear programming procedures. Both models lead to tasks of high dimensionality, for solutions of which different heuristics are used. For example, Lagrange relaxation [4], columns generation [5], unit problem [6].

Objective. The article aims to introduce new heuristic methods of developing schedules of long-distance passenger rail transport.

Methods. The authors use general scientific and mathematical methods, comparative analysis, evaluation approach, modeling, greedy algorithms, ranking methods within decision-making theory.

Results.

1.

In the process of algorithmization and development of software to generate schedules the authors applied the following concepts [7]: software solution to the problem within the framework of traffic safety control; two-step solution process; ideology of a greedy algorithm; concepts of congestion and uniformity; the use of ranking methods of decision-making theory.

A two-step problem solving process includes the development of an initial schedule and its subsequent optimization. The initial schedule is a schedule created by a program subject to mandatory restrictions. Methods of both phases are cyclical and are completed after inclusion of all routes in the initial schedule, or if it is impossible to further improve schedule.

The task of forming the initial schedule is solved by sequential selection of the next route and its subsequent inclusion in the schedule at the designated time of departure from the starting station. Route selection is based on the concept of congestion, i.e. at each step the busiest route for the required resources is determined. The timing of the inclusion of the route is based on the concept of uniformity of system resources use. That is, at each step of the formation of the initial schedule there are two selection operations.

The task of optimizing the initial timetable is solved with a consistent selection of the most irregular route and its subsequent rearrangement in the schedule at a designated time of departure from the starting station. Rearrangement of the route in the schedule is also based on the concept of uniformity. At each step of optimizing the schedule there are again two selection operations.

This approach is characteristic of greedy algorithms, and it is applicable to problems of formation of schedules and related resource allocation tasks. Using the ideology of greedy algorithms cyclicity of procedures for both phases of the solution of the problem of schedule development is assumed.

Operations of selection under the presented algorithms are multicriteria and for their implementation ranking methods apparatus is attracted [8].

2.

Initial task data:

$S = \{s_i, i = \overline{1, I}\}$ – a set of stations of the railway

network;

$L = \{l_j, j = \overline{1, J}\}$ – a set of hauls of the railway

network;

pl_i – a number of platforms for boarding/unboarding of passengers of i -th station;

$\Delta t_{i,j}$ – minimum time interval between two successive trains at exit/entrance to j -th haul to the i -th station;

$F = \{(s, l), s \in S, l \in L\}$ – a plurality of incident

pairs – station s is one of two boundary stations of the haul l . Obviously, the number of elements of the set F is $n_f = 2 \cdot J$;

n_r – number of routes of the railway network;

$R = \{r_k, k = \overline{1, n_r}\}$ – set of vectors of route's

applications;

$n_{k,s}$ – number of stations of the route r_k ;

$$r_k = \left(f_{k,i}, \forall f_{k,i} \in F, i = \overline{1, n_{k,s}} \right) = \left(l_{k,i}, s_{k,i}, i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r} \right) \quad (1)$$

vector of applications of the route r_k – sequence of pairs – haul/station from the starting to the ending station;

n_d – number of days of the interval schedule;
 $\text{Day} = (\text{day}_1, \text{day}_2, \dots, \text{day}_{n_d})$ – ordered by the time vector of the day;
 $\text{Interval} = 24 \cdot n_d$ – interval of the schedule, hours;
 n_k – number of days of departure of trains of the k -th route;

$\text{Day}_k = \{\text{day}_{k,i}, i = \overline{1, n_k}, \text{day}_{k,i} \in \text{Day}\}, k = \overline{1, n_r}$ – a set of days of departure of trains of the routes;

$n_i = \sum_{k=1}^{n_r} n_k$ – number of trains of the schedule;

$U = \{(r, \text{day}), r \in R, \text{day} \in \text{Day}\}$ – a plurality of incident pairs, partially forming the applications of the trains of routes – the train of the route r should depart from the starting station on the day of day; using (1) we get a plurality of applications of routes of trains:

$$U = \left\{ \begin{array}{l} \text{day}_{k,j}, (i_{k,j}, s_{k,j}), i = \overline{1, n_{k,s}}, \\ k = \overline{1, n_r}, j = \overline{1, n_k}, \text{day}_{k,j} \in \text{Day} \end{array} \right\}; \quad (2)$$

$d_{k,j} = (i_{k,j}, s_{k,j}, \text{int}_{k,j}), i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}$ – application to pass the route k along i -th haul to the i -th station, where $\text{int}_{k,j}$ – time interval of movement from $(i-1)$ -th station to the i -th station; application of passage of train $u_{k,j}$ along i -th haul to the i -th station

$$d_{k,j} = \left(\begin{array}{l} (i_{k,j}, s_{k,j}, \text{int}_{k,j}, \text{day}_{k,j}), i = \overline{1, n_{k,s}}, \\ k = \overline{1, n_r}, j = \overline{1, n_k}, \text{day}_{k,j} \in \text{Day} \end{array} \right), \quad (3)$$

where $\text{day}_{k,j}$ is taken equal to the day of departure of the train of the route.

The initial calculation data of the task:

$nt_i, i = \overline{1, I}$ – number of trains passing through the i -th station;
 $nl_j, j = \overline{1, J}$ – number of trains passing through the j -th haul.

3.

Variable tasks:

ni – number of routes included in the initial or optimized (rearranged) routes in the schedule;
 nr – number of routes not included in the initial schedule or non-optimized routes in the schedule;
 nit – number of trains included in the initial schedule;
 nit_i – number of trains included in the initial schedule, passing through the i -th station;
 nil_j – number of trains included in the initial schedule, passing through the j -th haul;
 ti , tf – time of arrival/departure of trains to the station;
 til , tfl – time of train entrance to the haul and exit from the haul;

Tl_k – time of departure of trains of the route r_k from the starting station, $Tl_k = ti_{k,1}$.

The event of the schedule, generated by the application (3), on passage of the train $u_{k,j}$ of the route r_k along the i -th haul to the i -th station will be determined by the following expression

$$e_{k,j} = \left(\begin{array}{l} (i_{k,j}, s_{k,j}, \text{int}_{k,j}, \text{day}_{k,j}, ti_{k,j}, tf_{k,j}), i = \overline{1, n_{k,s}}, \\ k = \overline{1, n_r}, j = \overline{1, n_k}, \text{day}_{k,j} \in \text{Day} \end{array} \right); \quad (4)$$

$\text{day}_{k,j}$, $ti_{k,j}$ and $tf_{k,j}$ in (4) are determined at each step of formation of the schedule;
assessment of occupancy of the i -th station on trains passing through it

$$cl_i = \frac{nt_i - nit_i}{nt - nit}, i = \overline{1, nit_i}; \quad (5)$$

assessment of occupancy of the j -th haul on trains passing through it

$$c2_j = \frac{nl_j - nil_j}{nt - nit}, j = \overline{1, nil_j}; \quad (6)$$

scalar assessment of occupancy of the k -th route for days of the schedule

$$c3_k = \frac{n_k}{n_d}, k = \overline{1, n_r}; \quad (7)$$

Assessment of uniformity of the event of the schedule of the i -th station $k1$

$$k1_{k,j} = \frac{nit_i (ti_{suc} + ti_{prec} - 2ti_{k,j})}{2 * \text{Interval}}, i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}, j = \overline{1, n_k}, \quad (8)$$

where ti_{prec} and ti_{suc} – time of arrival to the i -th station of trains, preceding and following with respect to $ti_{k,j}$ in the interval of the schedule;

assessment of uniformity of the event $e_{k,i,j}$ in the periods of the schedule of the i -th station

$$k2_{k,j} = \frac{\sum_{j=1}^{n_d} q(s_{k,j}, t_{k,j}, \text{day}_{k,j})}{n_d}, \quad (9)$$

where

$$q = q(s_{k,j}, t_{k,j}, \text{day}_{k,j}) = \begin{cases} 1, & \text{if at least one train during time } t_{k,j} \text{ of the day } \text{day}_{k,j} \text{ is at the station } s_{k,i}; \\ 0 & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$q \in Q_s$ – a set of Boolean notations of the events of stations;

assessment of uniformity of distribution of events $K1_i$ of the schedule i -th station in the interval of the schedule

$$K1_i = \sqrt{\frac{1}{nt_i} \sum_{j=1}^{nt_i} (Int_i - Intr_{i,j})^2}, i = \overline{1, I}, \quad (10)$$

where $Int_i = \frac{\text{Interval}}{nt_i}, i = \overline{1, I}$ – average value of the interval between arrivals of trains to the i -th station;

$Intr_{i,j} = (ti_{j+1} - ti_j), j = \overline{1, nt_i}, i = \overline{1, I}$ – value of the interval between arrivals at the station of two trains closest in time. For $j = nt_i, ti_{j+1} = ti_j$;

assessment of uniformity of the event of the schedule of the i -th haul $k3_{k,i,j}$

$$k3_{k,j} = \frac{nil_j (ti_{suc} + ti_{prec} - 2ti_{k,j})}{2 * \text{Interval}}, i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}, j = \overline{1, n_k}, \quad (11)$$





where $t_{i,rec}$ and $t_{i,suc}$ – time of start of motion of trains on the i -th haul of preceding and following in relation to time $t_{k,i,j}$.

assessment of uniformity of distribution of the event $e_{k,i,j}$ in the periods of the schedule of the i -th haul at entrance/exit from the station

$$k4_{k,i,j} = \frac{\sum_{j=1}^{n_d} q(t_{k,i,j}, s_{k,i,j}, t_{k,i,j}, day_{k,i,j})}{n_d}, \quad (12)$$

where

$$q = q(s_{k,i,j}, t_{k,i,j}, day_{k,i,j}) = \begin{cases} 1, & \text{if at least one train on } t_{k,i,j} \text{ of} \\ & \text{the day } day_{k,i,j} \text{ enters or leaves} \\ & \text{the station } s_{k,i,j} \text{ to the haul } l_{k,i,j}; \\ 0 & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$q \in Q_i$ – a plurality of Boolean notations of the events of the haul;

Assessment of distribution of events $K2_i$ of the schedule of the i -th haul in the interval of the schedule

$$K2_i = \sqrt{\frac{1}{n_{l_i}} \sum_{j=1}^{n_{l_i}} (Int_i - Intr_{i,j})^2}, \quad (13)$$

$i = \overline{1, J}$,

where $Int_i = \frac{Interval}{n_{l_i}}$, $i = \overline{1, J}$ – average value of the

interval between the start of motion of trains on the i -th haul;

$Intr_{i,j} = (t_{j+1} - t_{i,j})$, $j = \overline{1, n_{l_i}}$, $i = \overline{1, J}$ – value of

interval between start of motion of trains on the i -th haul of two trains closest in time.

4.

The task of formation of the initial schedule is a step-wise choice of another route r_{ni+1} and formation of the schedule $S = \{TI_i, i = \overline{1, ni+1}\}$, which minimized multicriterially four vectors of assessment of uniformity of events of stations and hauls of the selected route

$$\min \begin{cases} (k1_{ni+1,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k2_{ni+1,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k3_{ni+1,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k4_{ni+1,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \end{cases} \quad (14)$$

at mandatory restrictions

$$\forall s, \forall day, \forall t \sum_{i \in Interval} q \leq pl_i; \quad (15)$$

$$\forall l, \forall day, \forall t (t_{il} - t_{il-1}) \geq \Delta t_{i,j}$$

$$\forall l, \forall day, \forall t (t_{fl} - t_{fl-1}) \geq \Delta t_{i,j}. \quad (16)$$

The objective function (14) provides a multicriterion minimization of assessment of uniformity of events of the schedule of stations and hauls at inclusion of the next route in the initial schedule. Restrictions (15) relate to the simultaneous location of trains at the station in the range of not more than the number of tracks with passenger platforms.

Restrictions (16) reflect required intervals between successive entrances and exits of trains from the station and to the station.

Assessment of occupancy of stations (5) and hauls (6) form a plurality of the first and second vector components of routes' congestion:

$$\{ (c1_{1,k}, c1_{2,k}, \dots, c1_{i,k}, i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, nr}) \}; \quad (17)$$

$$\{ (c2_{1,k}, c2_{2,k}, \dots, c2_{i,k}, i = \overline{1, n_{k,s}-1}, k = \overline{1, nr}) \}. \quad (18)$$

Multicriteria ranking of vectors (17) and (18) generates a plurality of ranks of routes according to occupancy of stations and hauls:

$$\{ rank1_k, k = \overline{1, nr} \}; \quad (19)$$

$$\{ rank2_k, k = \overline{1, nr} \}. \quad (20)$$

Reverse sorting of expressions (7) generates a plurality of ranks of routes according to occupancy of days of the interval of the schedule

$$\{ rank3_k, k = \overline{1, nr} \}. \quad (21)$$

Ranks (19, 20, 21) form a set of vectors of routes

$$\{ (rank1_k, rank2_k, rank3_k), k = \overline{1, nr} \}. \quad (22)$$

Route senior in rank, obtained due to multicriteria ranking of vectors (22), is the busiest and becomes the next candidate r_{ni+1} for inclusion in the initial schedule.

To determine time of departure from the starting station TI_{ni+1} of trains of the route r_{ni+1} the following actions are performed cyclically:

for $t_{ni+1,1} = 0$ in increments of $= 0, 1$ hours to 24 hours determination of values of estimates (8, 9, 11, 12) for all hauls and stations of the route with account of restrictions (15, 16) and accumulation of a set of vectors

$$\{ t_{ni+1,1}, (k1_{ni+1,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}; \quad (23)$$

$$\{ t_{ni+1,1}, (k2_{ni+1,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}; \quad (24)$$

$$\{ t_{ni+1,1}, (k3_{ni+1,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}; \quad (25)$$

$$\{ t_{ni+1,1}, (k4_{ni+1,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}. \quad (26)$$

Multicriteria ranking of vectors (23, 24, 25, 26) form sets of vectors of ranks for the time of starting motion of trains of the route r_{ni+1}

$$\{ t_{ni+1,1}, (rank1, rank2, rank3, rank4), t_{ni+1,1} = 0, 240 \}. \quad (27)$$

Multicriteria ranking of vectors (27) determines the starting time TI_{ni+1} of motion of trains of the route r_{ni+1} in the initial schedule.

5.

The task of optimizing the initial schedule is a stepwise choice of a next route r_{ni+1} and formation

of a schedule $S = \{TI_i, i = \overline{1, ni+1}\}$ that minimizes multicriterially two vectors of assessment of uniformity of stations and hauls of the selected route

$$\min \left\{ \begin{pmatrix} K1_i, i = \overline{1, I} \\ K2_i, i = \overline{1, J} \end{pmatrix} \right\} \quad (28)$$

at mandatory restrictions (15) and (16).

The objective function (28) minimizes the mean-square deviations of intervals between events at stations and hauls. The objective function is related to the necessity of multi-criteria ranking of derived vectors (28). The completion of the initial transport schedule optimization is due to action strategy taken.

Estimates of uniformity of distribution of events of station schedules (10) and hauls (13) form a plurality of first and second vector components of uniformity of routes on the next step in optimizing the initial schedule

$$\left\{ \begin{pmatrix} \alpha_{s,i} K1_{1,k}, \alpha_{s,2} K1_{2,k}, \dots, \\ \alpha_{s,k} K1_{i,k}, i = \overline{1, n_{k,s}} \end{pmatrix}, k = \overline{1, nr} \right\}, \quad (29)$$

where $\alpha_{s,i}$ – coefficient of importance of assessment,

$$\alpha_{s,i} = \frac{nt_i}{\sum_{j=1}^J nt_j}.$$

$$\left\{ \begin{pmatrix} \alpha_{l,i} K2_{1,k}, \alpha_{l,2} K2_{2,k}, \dots, \\ \alpha_{l,k} K2_{i,k}, i = \overline{2, n_{k,s}} \end{pmatrix}, k = \overline{1, nr} \right\}, \quad (30)$$

where $\alpha_{l,i}$ – coefficient of importance of assessment,

$$\alpha_{l,i} = \frac{nl_i}{\sum_{j=1}^J nl_j}.$$

Multicriteria ranking of vectors (29) generates a plurality of ranks of routes in uniformity of stations

$$\{rank1_k, k = \overline{1, nr}\}. \quad (31)$$

Multicriteria ranking of vectors (30) generates a plurality of ranks of routes in uniformity of hauls

$$\{rank2_k, k = \overline{1, nr}\}. \quad (32)$$

Ranks (31, 32) form a set of vectors (uniformity criteria) of routes

$$\{ (rank1_k, rank2_k), k = \overline{1, nr} \}. \quad (33)$$

The route senior in rank, obtained by multicriteria ranking of vectors (33), is the most unequal at taken estimates and criteria of uniformity. It becomes a next candidate r_{ni+1} for rearrangement in the initial schedule.

To determine the time of departure from the starting station TI_{ni+1} of trains of the route r_{ni+1} the following actions are performed cyclically:

for $ti_{ni+1,1} = 0$ in increments of $\Delta t = 0,1$ hours to 24 hours determination of values of estimates (10, 13) for all hauls and stations of the route with account of restrictions (15, 16) and accumulation of a set of vectors

$$\left\{ ti_{ni+1,1}, \begin{pmatrix} \alpha_{s,i} K1_{ni+1,i,j}, \\ i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}} \end{pmatrix} \right\}; \quad (34)$$

$$\left\{ ti_{ni+1,1}, \begin{pmatrix} \alpha_{l,i} K2_{ni+1,i,j}, \\ i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}} \end{pmatrix} \right\}. \quad (35)$$

Multicriteria ranking of vectors for sets of vectors of ranks for the initial time of starting motion of trains of the route r_{ni+1}

$$\{ ti_{ni+1,1}, (rank1, rank2), ti_{ni+1,i} = \overline{0, 240} \}. \quad (36)$$

Multicriteria ranking of vectors (36) determines the desired starting time TI_{ni+1} of motion of trains of the route r_{ni+1} in the optimized schedule of the railway network.

Conclusion. The proposed mathematical model and algorithms of formation and optimization of the initial schedule are to be implemented in software as part of the traffic safety control system.

REFERENCES

1. Lazarev, A. A., Musatova, E. G., Gafarov, E. R., Kvaratskhelia, A. G. Scheduling Theory. Tasks of transport system control [Teoriya raspisanij. Zadachi upravleniya transportnymi sistemami]. Moscow, Faculty of Physics, Moscow State University, 2012, 159 p.
2. Peeters, L. Cyclic Railway Timetable Optimization, ERIM Ph.D. series Research in Management, Erasmus Research inst. of Management (ERIM), 2002.
3. Caprara, A., Fischetti, M., Toth, P. Modeling and solving the train timetabling problem, Operations Research, 2002, 50 (5), pp. 851–861.
4. Fischer, F., Helmberg, C., Jansen, J., Krostitz, B. Towards solving very large scale train timetabling problems by Lagrangian relaxation, paper presented at the ATMOS2008 – 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems, Dagstuhl, Germany.
5. Cacchiani, V., Caprara, A., Toth, P. A column generation approach to train timetabling on a corridor, 2008, 4OR, 6 (2), pp. 125–142.
6. Burdett, R., Kozan, E. A sequencing approach for creating new train timetables, OR Spectrum, 2010, 32 (1), pp. 163–193.
7. Klevansky, N. N. Main concepts of implementation of tasks of schedule formation [Osnovnye koncepcii realizacii zadach formirovaniya raspisanij]. Obrazovatel'nye resursy i tehnologii, 2014, Iss. 2, pp. 9–21.
8. Klevansky, N. N. Methods of ranking in the tasks of schedule formation [Metody ranzhirovaniya v zadachah formirovaniya raspisanij]. Proceedings of the XII All-Russia meeting on management problems governance: VSPU – 2014. Moscow, 2014, pp. 8040–8050.

Information about the authors:

Klevansky, Nikolai N. – Ph.D. (Eng.), professor of the department of Economic Cybernetics Saratov State Agrarian University n.a. N. I. Vavilov, Saratov, Russia, nklevansky@yandex.ru.

Antipov, Maksim A. – Ph.D. student of Saratov State Agrarian University n.a. N. I. Vavilov, Saratov, Russia, antipovmaksim@ya.ru.

Article received 27.06.2016, accepted 30.08.2016.

